
© Г.В. АНИКИН, С.Н. ПЛОТНИКОВ, А.А. ВАКУЛИН,
К.А. СПАСЕННИКОВА
plotnikov59@yandex.ru

УДК 624.139

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ПОД ОБЪЕКТАМИ, ПОСТРОЕННЫМИ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ*

АННОТАЦИЯ. В работе проводится расчет состояния грунтов под резервуаром с нефтью, расположенном на Варандейском нефтяном месторождении, охлаждаемом слабонаклонными термостабилизаторами производства ОАО «Фундаментпроект». Рассматриваются 47 вариантов развития событий на протяжении восьми лет, каждый из которых генерируется с помощью метода Монте-Карло на основании распределений метеорологических характеристик (скорости ветра и температуры окружающего воздуха), полученных путем усреднения архивных данных метеостанции Варандей. Для каждого варианта развития ситуации в будущем были вычислены температурные поля в расчетной области под резервуаром с нефтью. Показывается, что разброс по температурам грунта для различных вариантов значителен, что ставит под сомнение обычный одновариантный прогноз, используемый для расчетов при проектировании и строительстве в условиях вечной мерзлоты. В связи с этим в работе предлагается метод стохастического прогнозирования, позволяющий выявлять наихудший вариант развития событий, который и должен рассматриваться при проектировании.

SUMMARY. The study estimates the condition of the ground under the Varandey Oil Field, cooled by flat heat stabilizers produced by "Fundamentproekt" Co. Forty seven options are developed for further development of events for eight years ahead, each of these options generated via the Monte Carlo method on the basis of distribution of meteorological data obtained through averaging the archival data from Varandey meteorological station. Temperature profiles of computational regions under the oil tank were calculated for every option of the situation development. It is demonstrated that ground temperature values scatter considerably, which makes the application of conventional single-option forecast doubtful. In connection with this, the study suggests stochastic forecast that allows identifying the worst scenario which must be considered in the course of designing.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Термостабилизатор, резервуар, нефть, фундамент, моделирование.

KEY WORDS. Thermostabilizer, tank, oil, foundation, simulation.

* Работа выполнена при финансовой поддержке победителей конкурса «Компьютерный континуум: от идеи до воплощения», проведенного Фондом «Сколково» и корпорацией «Intel»

Природные богатства северных и восточных районов России приобретают все большее значение, поэтому перспективные планы экономического и социального развития страны предусматривают интенсивное освоение огромных малонаселенных пространств, лежащих к востоку от Урала и других необжитых районов. Это порождает новые проблемы, часть которых связана со строительством инженерных сооружений на вечномёрзлых грунтах в районах с суровыми климатическими условиями [1].

Районы распространения вечномёрзлых грунтов занимают 65% России, поэтому очень важна разработка эффективных методов строительства в специфических условиях этих районов [2]. С точки зрения уменьшения себестоимости добычи и транспортировки нефти особое значение приобретает строительство нефтяных резервуаров большой емкости (10000 — 100000м³) вблизи эксплуатируемых нефтяных месторождений.

В данной работе приведен расчет и стохастический прогноз температурных полей под нефтяным резервуаром емкостью 50000м³ (РВС 50000) с системой слабонаклонных термостабилизаторов производства ФГУП «Фундаментпроект», установленным на Варандейском месторождении [3,4].

Нефтяной резервуар на месторождении представляет собой цилиндр с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 60,70$ м и внешним диаметром $d_{\text{внеш}} = 66,07$ м. Между внутренней стенкой резервуара и его внешней стенкой имеется воздух для предотвращения боковых тепловых потоков. Нефть в емкости находится при температуре 45°С. Под резервуаром расположен слой насыпного грунта толщиной $l_1 = 0,60$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda_1 = 0,95 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$, под этим слоем — слой термоизолятора толщиной $l_2 = 0,40$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,04 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$, под термоизолятором находится насыпной слой песка, замороженный первоначально с помощью холодильных машин и имеющий толщину $l_3 = 3,0$ м и коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{гр}} = 1,73 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$. В данном слое песка на расстоянии $l_x = 1,25$ м от нижней кромки термоизолятора, параллельно друг к другу, расположены испарители термосифонов с шагом $l_y = 1,0$ м. Общий вид расположения термосифонов в трех проекциях изображен на рис. 1.

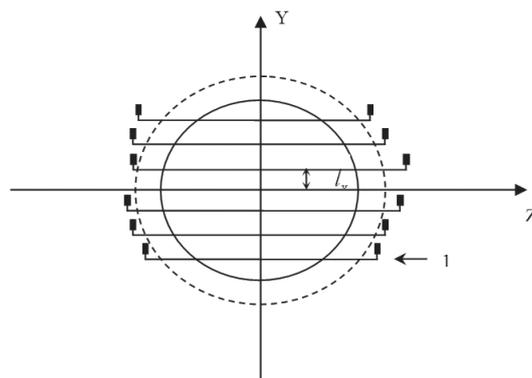


Рис.1 (а)

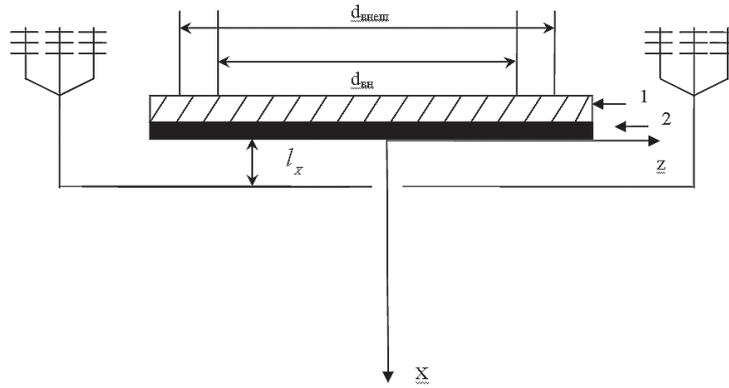


Рис.1 (б)

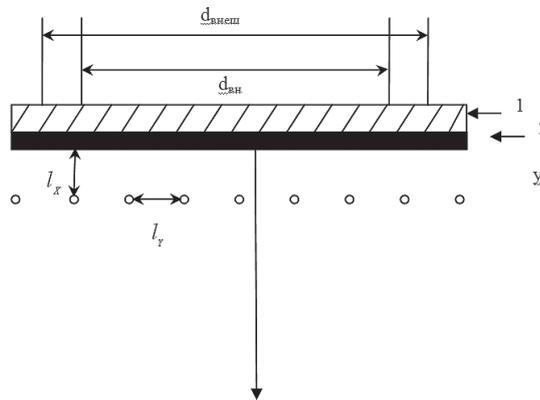


Рис.1 (в)

Испарители термосифонов наклонены к горизонтали на один-два градуса, и, поэтому их, с достаточной точностью, можно считать горизонтальными.

Для расчета тепломассопереноса в грунте применялся метод эффективной теплоемкости [5], в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в виде

$$[c + L\delta(T - T_f)] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c — объемная теплоемкость грунта, λ — коэффициент теплопроводности грунта, T — температура, T_f — температура фазового перехода, x, y, z — декартовы координаты, t — время, $\delta(T - T_f)$ — дельта-функция Дирака, L — за-

дается следующим выражением:

$$L = r \cdot (w - w_{\text{нв}}) \gamma_{\text{ск}}, \quad (2)$$

где r — удельная теплота плавления льда, w — влажность грунта, $w_{\text{нв}}$ — влажность незамерзшей воды, $\gamma_{\text{ск}}$ — объемная плотность скелета.

Сетка пространственных координат в расчетной области задается следующими выражениями:

$$x_i = i \cdot h_x \quad 0 \leq i \leq 100 \quad h_x = 0.1\text{м}$$

$$y_j = j \cdot h_y \quad 0 \leq j \leq 1000 \quad h_y = 0.1\text{м}$$

$$z_k = k \cdot h_z \quad 0 \leq k \leq 100 \quad h_z = 1\text{м}$$

$$t_n = \tau \cdot n \quad 0 \leq n \leq \infty \quad \tau = 0.01 \text{ сут.}$$

Испарители термостабилизаторов расположены параллельно оси z . Разностная схема, соответствующая уравнению (1), записывается в следующем виде

$$\begin{aligned} T(i, j, k, n + 1) = & \\ = T(i, j, k, n) + & \frac{a(i, j, k) \cdot \tau \cdot (T(i + 1, j, k, n) + T(i - 1, j, k, n) - 2T(i, j, k, n))}{h_x^2} + \\ & + \frac{a(i, j, k) \cdot \tau \cdot (T(i, j + 1, k, n) + T(i, j - 1, k, n) - 2T(i, j, k, n))}{h_y^2} + \\ & + \frac{a(i, j, k) \cdot \tau \cdot (T(i, j + 1, k, n) + T(i, j - 1, k, n) - 2T(i, j, k, n))}{h_y^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $a(i, j, k)$ — определяется следующими выражениями:

$$a(i, j, k) = \begin{cases} a_m & \text{при } T(i, j, k, n) < T_f - \Delta \\ \frac{0.5(\lambda_m + \lambda_t)}{0.5(c_m + c_t) + \frac{L}{2\Delta}} & \text{при } T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta \\ a_t & \text{при } T(i, j, k, n) > T_f + \Delta \end{cases}$$

Здесь a_t, a_m — температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно, λ_m, λ_t — коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, c_m, c_t — объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта. Величина Δ определяет в методе эффективной теплоемкости [5] диапазон температур, при которых идет фазовый переход, а именно $T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta$. При численном расчете $a(i, j, k)$ дельта-функция Дирака в выражении (1) заменена на функцию $f(T - T_f)$, задающуюся следующими выражениями [5]:

$$f(T - T_f) = \begin{cases} 0 & \text{при } |T - T_f| > \Delta \\ \frac{1}{2\Delta} & \text{при } |T - T_f| \leq \Delta. \end{cases}$$

На боковых поверхностях расчетной области принималось граничное условие второго рода (с тепловым потоком, равным нулю). На нижней границе расчетной области — граничное условие первого рода с температурой, равной начальной температуре. На верхней границе расчетной области принималось граничное условие третьего рода, причем в той части, которая находится под

резервуаром, учитывался теплообмен с резервуаром, в оставшейся части границы расчетной области — теплообмен с атмосферой.

Используя данные по температуре и скорости ветра за 2007- 2012 годы метеостанции Варандей мы получим распределения по температуре и скорости ветра для каждого из двенадцати месяцев года. Распределение вероятности температуры в течении каждого месяца хорошо описывается нормальным распределением [6]:

$$w(T) = \frac{e^{-\frac{(T-m)^2}{2\sigma^2}} dT}{\sqrt{2\pi}\sigma}, \quad (4)$$

где T — температура, m — математическое ожидание, σ — среднеквадратичное отклонение.

Распределение вероятности скорости ветра в течении каждого месяца хорошо описывается гамма распределением [6]

$$w(v) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} v^{\alpha-1} e^{-\lambda v} dv, \quad (5)$$

где v — скорость ветра, $\Gamma(a)$ — гамма функция, a и λ связаны с модой η и дисперсией Dv следующими соотношениями

$$\eta = \frac{\alpha - 1}{\lambda^2}, \quad Dv = \frac{\alpha}{\lambda^2}. \quad (6)$$

Оптимальные параметры для соответствующих распределений температур и скоростей ветра по месяцам приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Янв.	Фев.	Март.	Апр.	Май.	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.
m	-14,78	-18,9	-13	-7,13	-1,55	6,07	10,72	9,16	6,47	1,53	-7,83	-11,03
σ	7,18	8,8	6,93	6,61	5,09	5,9	4,6	3,0	3,16	3,49	7,7	9,02
a	3,04	3,07	2,73	3,79	4,0	3,57	3,86	4,94	3,4	5,03	2,73	4,73
λ	0,47	0,48	0,48	0,67	0,72	0,67	0,66	0,82	0,6	0,74	0,52	0,62

Используя распределения (4) и (5), смоделировали методом Монте-Карло [7] 47 различных случайных траекторий изменения температуры и скорости ветра в течение восьми лет. Для каждого варианта развития ситуации в будущем было рассчитано температурное поле в расчетной области, затем — среднее значение температуры на центральной оси и найдено среднее арифметическое величин по всем вариантам, а также отклонение для каждого варианта от этого среднеарифметического значения. Из всех отклонений выбрано самое большое по величине положительное отклонение (самый теплый вариант) и самое большое по величине отрицательное отклонение (самый холодный вариант). Распределение температуры по глубине на центральной оси расчетной области для обоих вариантов приведено на рис. 2.

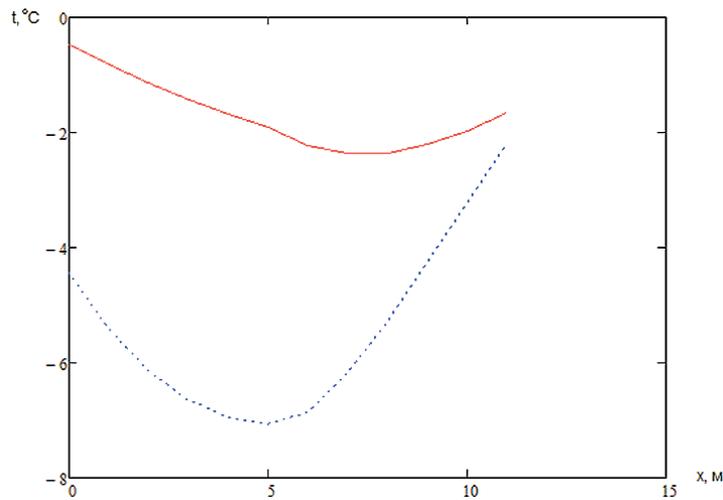


Рис. 2. Распределение температуры по глубине на центральной области

Как видно из рисунка, разброс между этими двумя вариантами может составлять 5 градусов, что означает некорректность часто используемого детерминистского прогноза и необходимость проведения и использования стохастического прогноза.

Расчеты проводились на суперкомпьютере НКС-30Т с использованием MPI-технологии параллельного программирования [8]. Соответствующие результаты расчетов температурных полей под резервуаром с нефтью иллюстрируются на рис. 3.

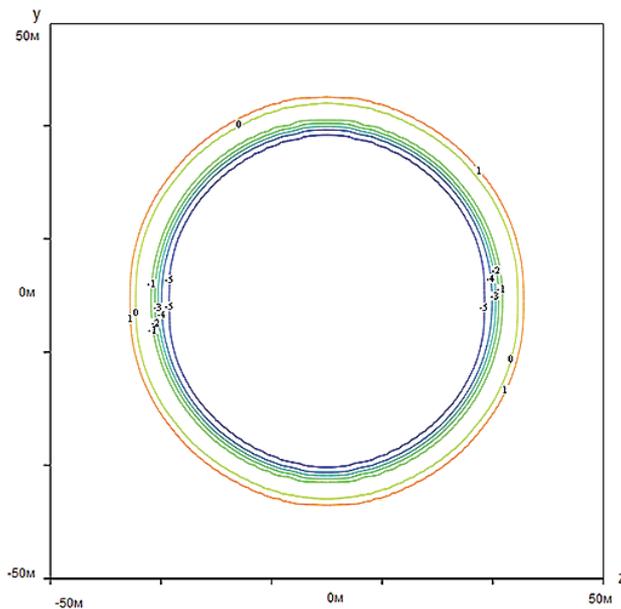


Рис. 3а. Температурное поле на уровне охлаждающих труб на конец августа расчетного восьмилетнего периода (самый холодный вариант)

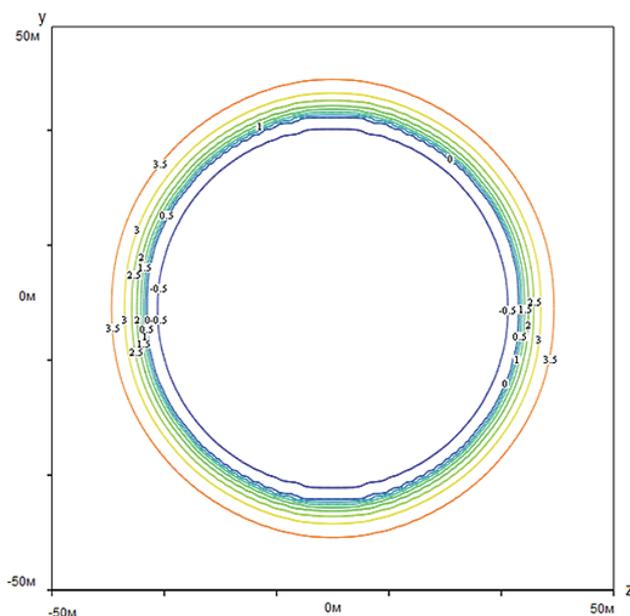


Рис. 36. Температурное поле на уровне охлаждающих труб на конец августа расчетного восьмилетнего периода (самый теплый вариант)

В заключение отметим, что основным фактором, определяющим механическую безопасность инженерных сооружений в криолитозоне является прочность и устойчивость грунтов оснований, изменяющихся под воздействием процессов природного и техногенного характера [9, 10]. При создании на этапе проектирования численной модели динамики температуры грунта, приводящего к потере механической безопасности (деформациям), необходимо использовать стохастический подход. Данный подход позволит прогнозировать достоверный сценарий развития негативных техногенных тепловых процессов и предложить эффективные технические решения по управлению этими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубина М.М. Прогноз и управление термомеханическим состоянием системы «сооружение-среда» в криолитозоне. В кн.: «Криосфера нефтегазоносных провинций». Институт проблем освоения Севера СО РАН. Тюмень, 2004, С. 56-57.
2. Вакулин А.А. Основы геокриологии. Тюмень, 2011. 220 с.
3. Андреев М.А., Миронов И.А., Терентьев А.В. Устройство оснований и фундаментов нефтяных резервуаров в сложных условиях Заполярья. Промышленное и гражданское строительство. 2006. №9. С. 35-36.
4. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Вакулин А.А., Спасенникова К.А. Расчет стабилизации температуры основания под резервуаром с нефтью // Вестник Тюменского государственного университета. 2009. №6. Серия «Физико-математические науки. Информатика». С. 35-45.
5. Самарский А.А, Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
6. Корольюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.

7. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике. С-Пб.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2011. 192 с.
8. Корнеев В.Г. Параллельное программирование в MPI. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2002. 215 с.
9. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномёрзлых грунтов оснований зданий и сооружений. Мат-лы междунар. конф. «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». Тюмень, 2008. С. 34-39.
10. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасеникова К.А. Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011. Т. 15. №1, С. 33-39.

REFERENCES

1. Dubina, M.M. Forecast and management of thermomechanical behavior for “structure-environment” system in the permafrost zone // *Kriosfera neftegazonosnyh provincij* [The cryosphere of oil and gas areas]. Tyumen, 2004. Pp. 56-57. (in Russian).
2. Vakulin, A.A. *Osnovy geokriologii* [Geocryology Fundamentals]. Tyumen: Tyumen State University Publ., 2011. 220 p. (in Russian).
3. Andreev, M.A., Mironov, I.A., Terent'ev, A.V. Construction of bases and foundations of oil tanks in the complicated conditions of the Arctic. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo — Industrial and Civil Engineering*. № 9. 2006. Pp. 35-36. (in Russian).
4. Anikin, G.V., Plotnikov, S.N., Vakulin, A.A., Spasennikova, K.A. Calculation for the foundation stabilizing temperature under the oil reservoir. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2009. № 6. Pp. 35-45. (in Russian).
5. Samarskij, A.A., Vabishhevich, P.N. *Vychislitel'naja teploperedacha* [Computational heat transmission]. М.: Editorial URSS, 2003. 784 p. (in Russian).
6. Koroljuk, V.S., Portenko, N.I., Skorohod, A.V. et al. *Spravochnik po teorii verojatnostej i matematicheskoj statistike* [Probability theory and mathematical statistics: a guide]. М.: Nauka, 1985. 640 p. (in Russian).
7. Ermakov, S.M. *Metod Monte-Karlo v vychislitel'noj matematike* [Monte Carlo method in numerical mathematics]. St. Petersburg, 2011. 192 p. (in Russian).
8. Korneev, V.G. *Parallel'noe programmirovanie v MPI* [MPI concurrent programming]. Novosibirsk. 2002, 215 p. (in Russian).
9. Dolgih, G.M., Okunev, S.N., Podenko, L.S., Feklistov, V.N. Effective maintenance of foundation stabilizing temperature systems for permafrost. [Nadezhnost', jeffektivnost' i upravljaemost' sistem temperaturnoj stabilizacii vechnomerzlyh gruntov osnovanij zdaniy i sooruzhenij]. *Mat-ly mezhdunarod. konf. «Kriogennye resursy poljarnyh i gornyh regionov. Sostojanie i perspektivy inzhenernogo merzlotovedenija»*. Tyumen, 2008. Pp. 34-39. (in Russian).
10. Anikin, G.V., Plotnikov, S.N., Spasennikova, K.A. Computer simulation for heat and weight transmission in ground horizontal cooling systems. *Kriosfera Zemli — Earth cryosphere*. 2011. Vol. 15. № 1. Pp. 33-39. (in Russian).